



CEMES



Ce que peut la matière : quelques éléments de réflexion à l'échelle du nanomètre

Xavier Bouju

Groupe Nanosciences - CEMES-CNRS, Toulouse



Christine Browaeys Bernard Monnier



Light Matters, Erwin Redl, photo © T3Nel 2019

13 juin 2019



« Personne n'a jusqu'à présent déterminé ce que peut le corps. »
« L'expérience n'a jusqu'ici enseigné à personne ce que, grâce aux seules lois de la Nature, le corps peut ou ne peut pas faire, à moins d'être déterminé par l'esprit. Car personne jusqu'ici n'a connu la structure du corps assez exactement pour en expliquer toutes les fonctions. »

L'Éthique, Spinoza

« Personne n'a jusqu'à présent déterminé ce que peut le **corps**. »
« L'expérience n'a jusqu'ici enseigné à personne ce que, grâce
aux seules lois de la Nature, le **corps** peut ou ne peut pas faire,
à moins d'être déterminé par l'esprit. Car personne jusqu'ici n'a
connu la structure du **corps** assez exactement pour en
expliquer toutes les fonctions. »

L'Éthique, Spinoza

corps → **matière**

« Personne n'a jusqu'à présent déterminé ce que peut le **corps**. »
« L'expérience n'a jusqu'ici enseigné à personne ce que, grâce
aux seules lois de la Nature, le **corps** peut ou ne peut pas faire,
à moins d'être déterminé par l'esprit. Car personne jusqu'ici n'a
connu la structure du **corps** assez exactement pour en
expliquer toutes les fonctions. »

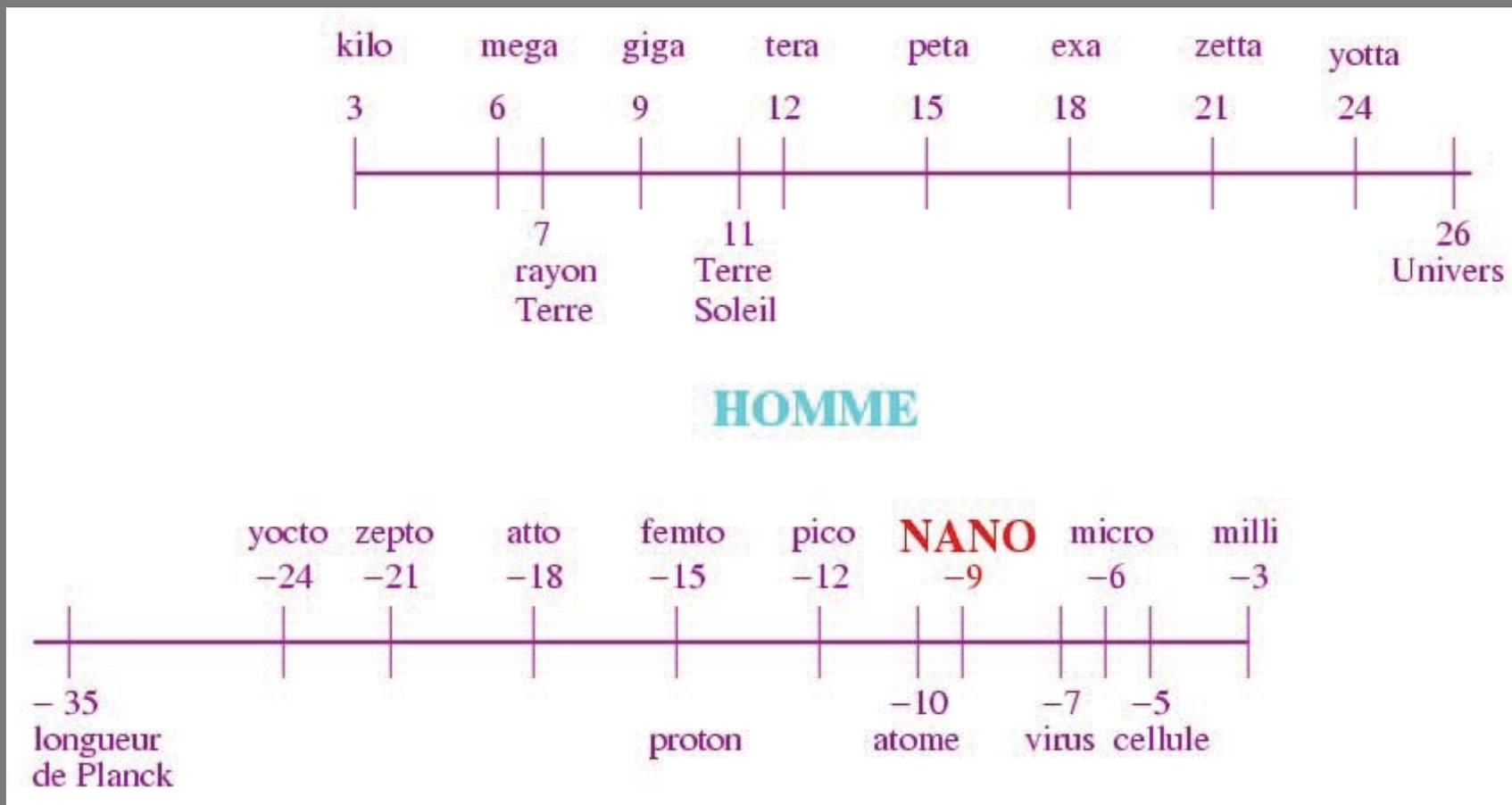
L'Éthique, Spinoza

corps → **matière**

Ce que peut la **matière** ?

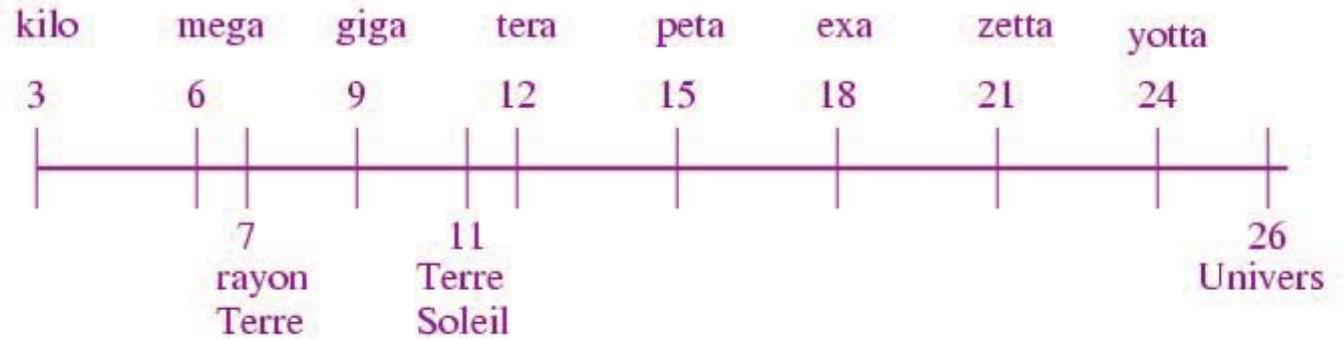
Car personne jusqu'ici n'a connu la **structure** de la matière
assez exactement pour en expliquer les **fonctions**.

Nanomètre ?

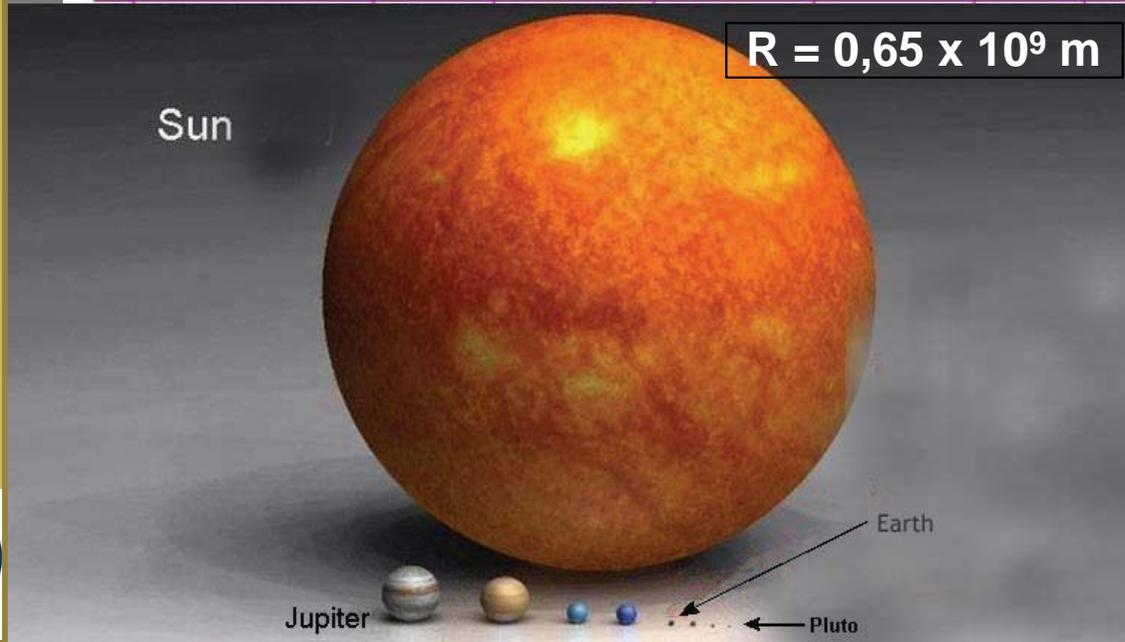
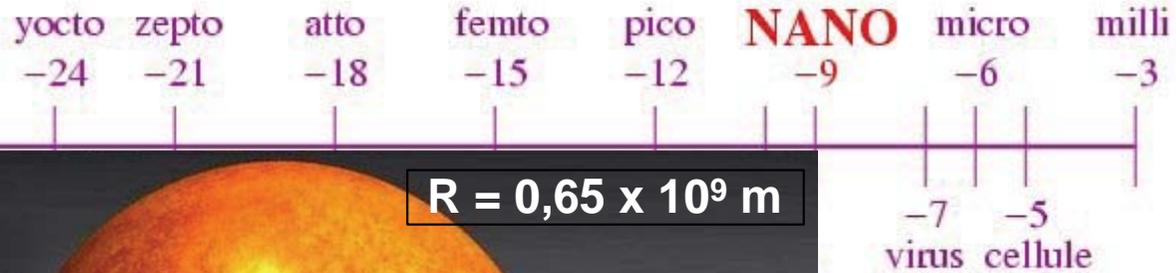


Échelle logarithmique

Nanomètre ?



HOMME



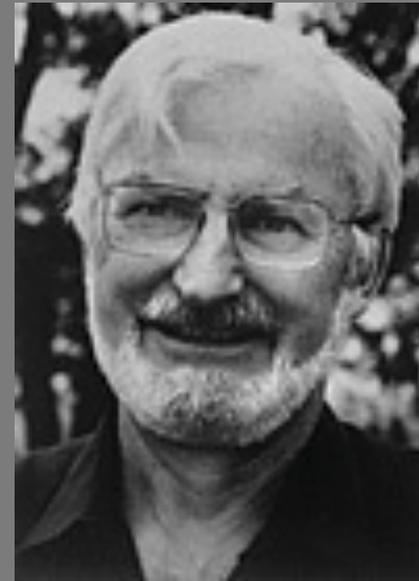
Fabriquer une image

Les sondes locales

STM : microscope à effet tunnel électronique



Gerd Binnig

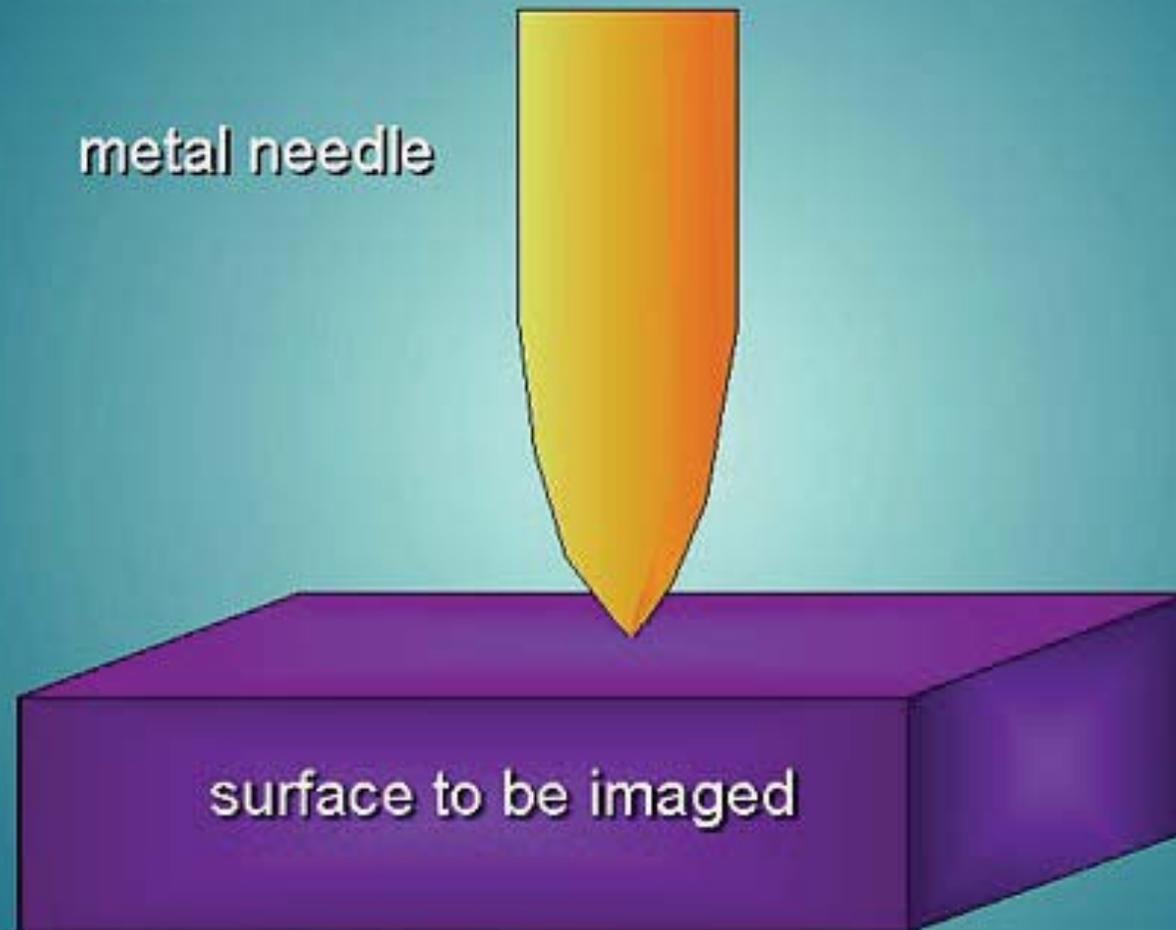


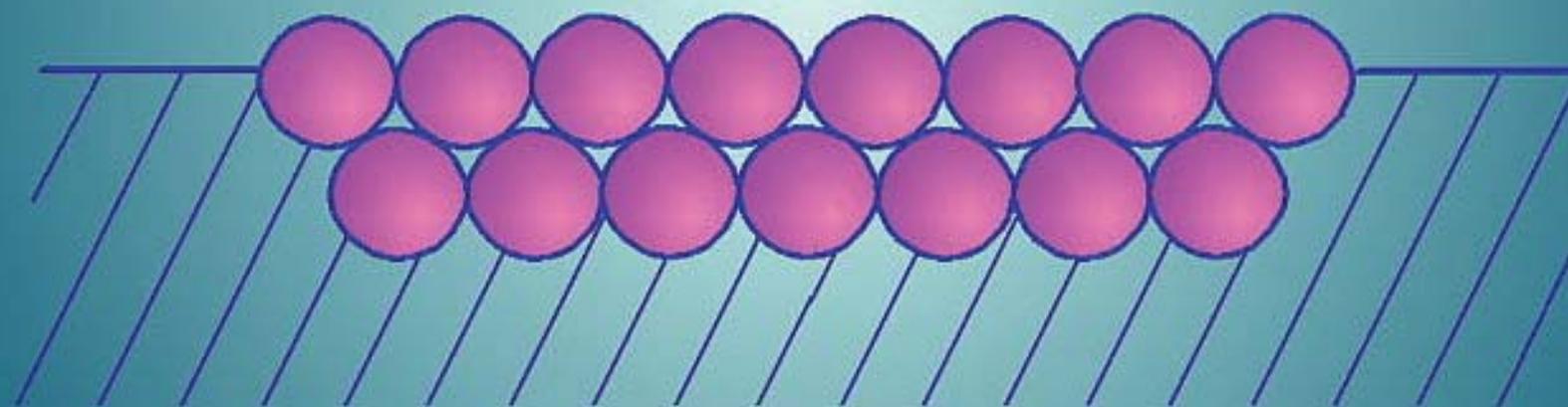
Heinrich Rohrer

IBM Zürich

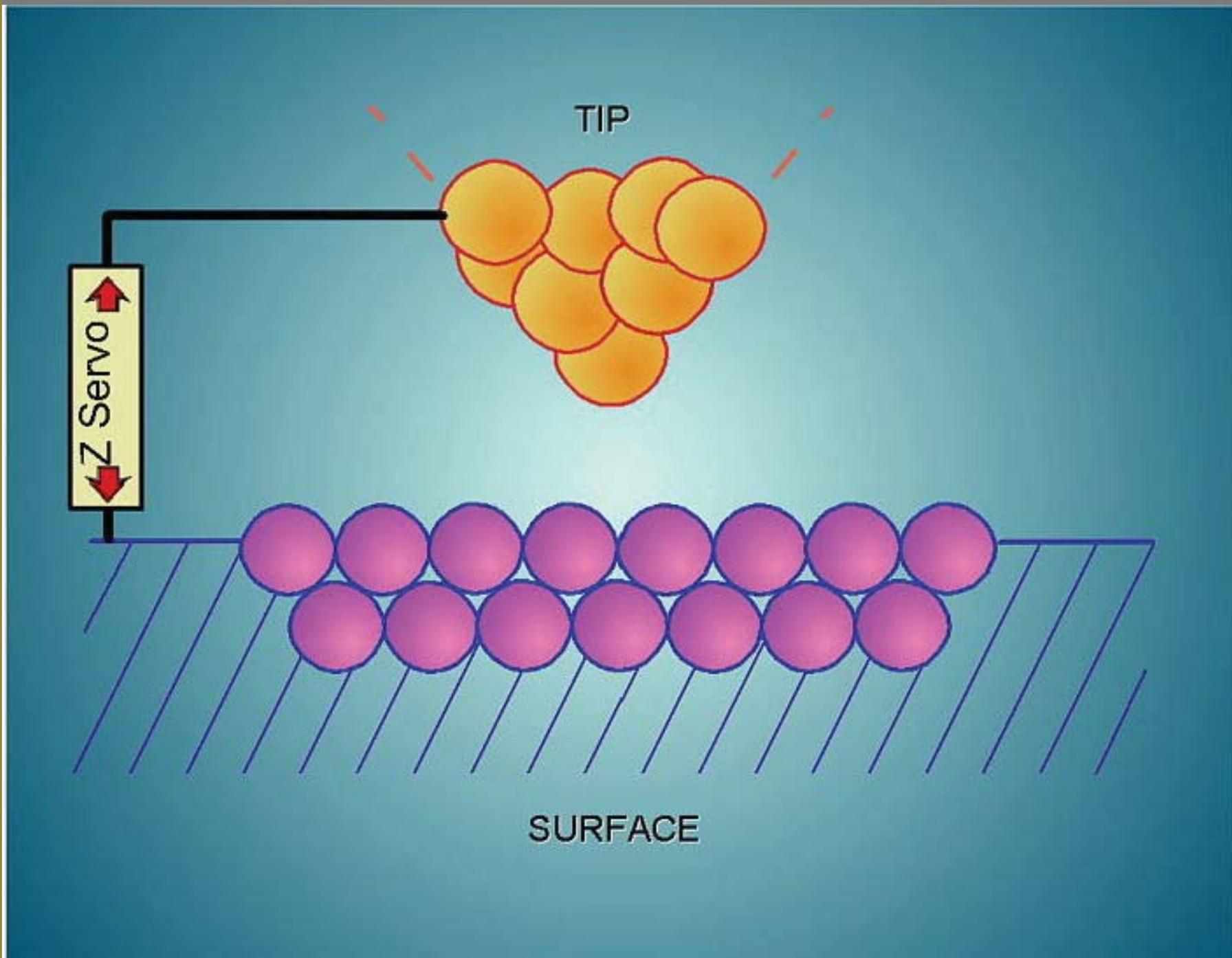
Prix Nobel 1986

Fabriquer une image

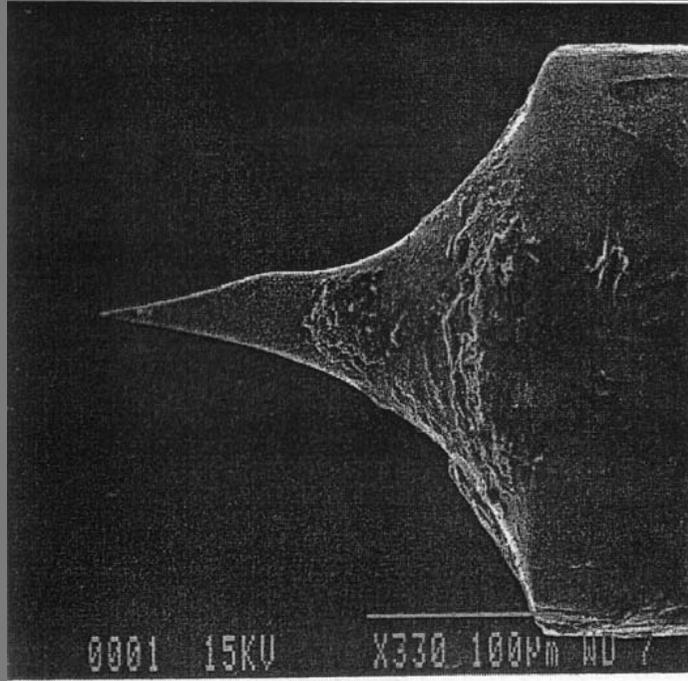




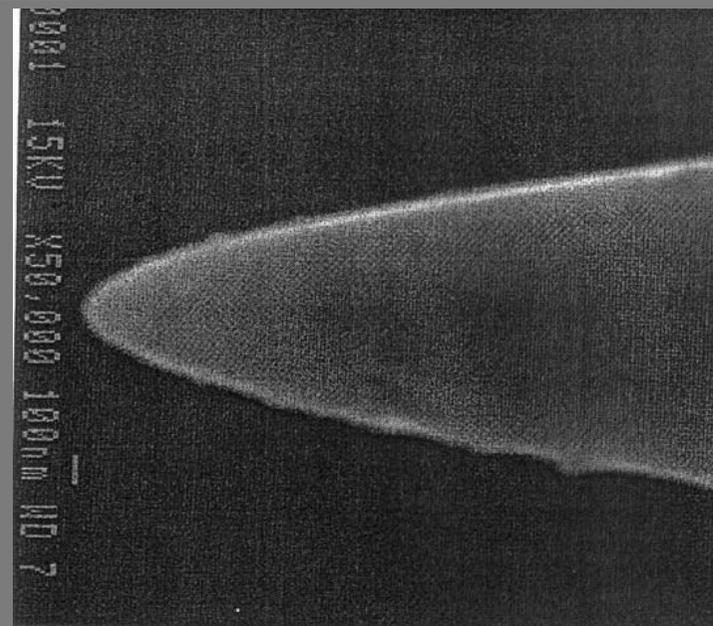
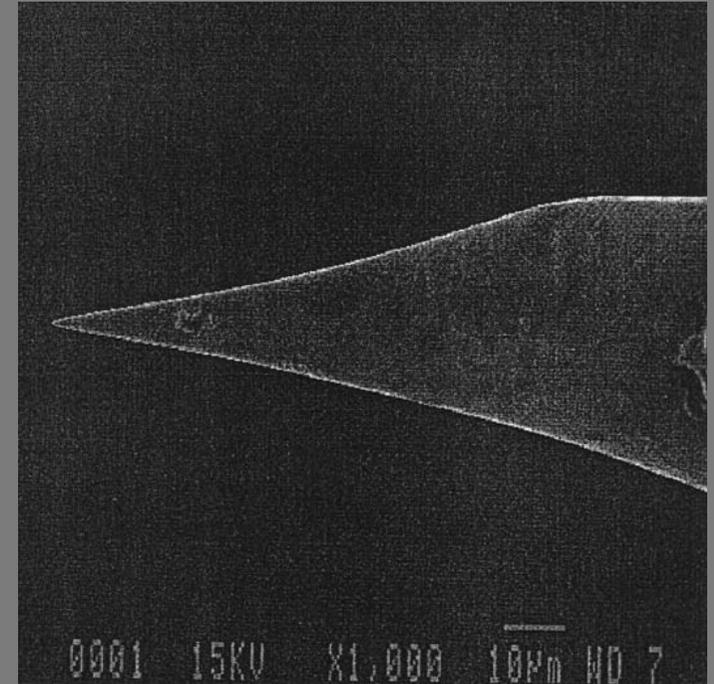
SURFACE



Pointes

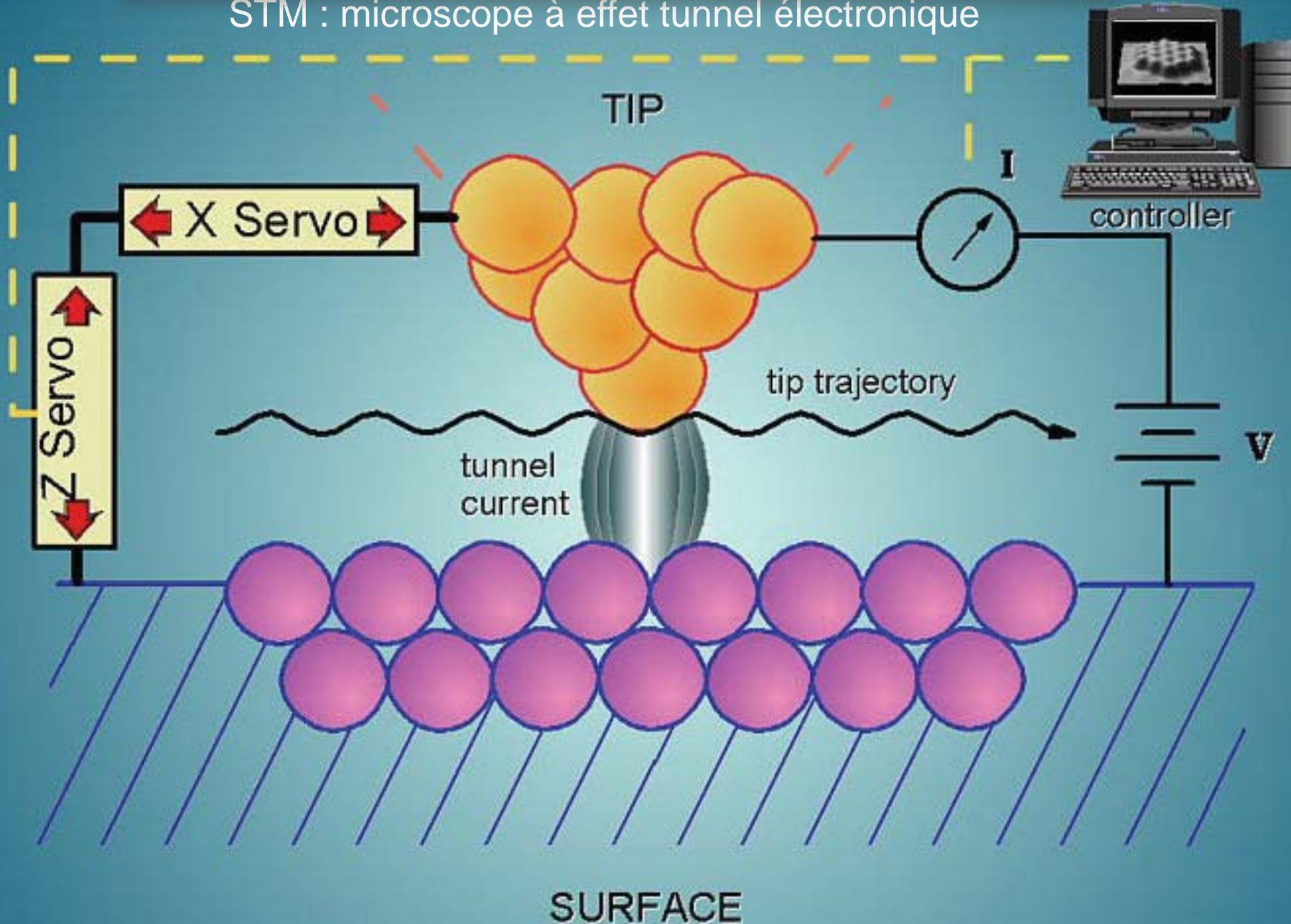


Rayon de
courbure :
~ 50 nm



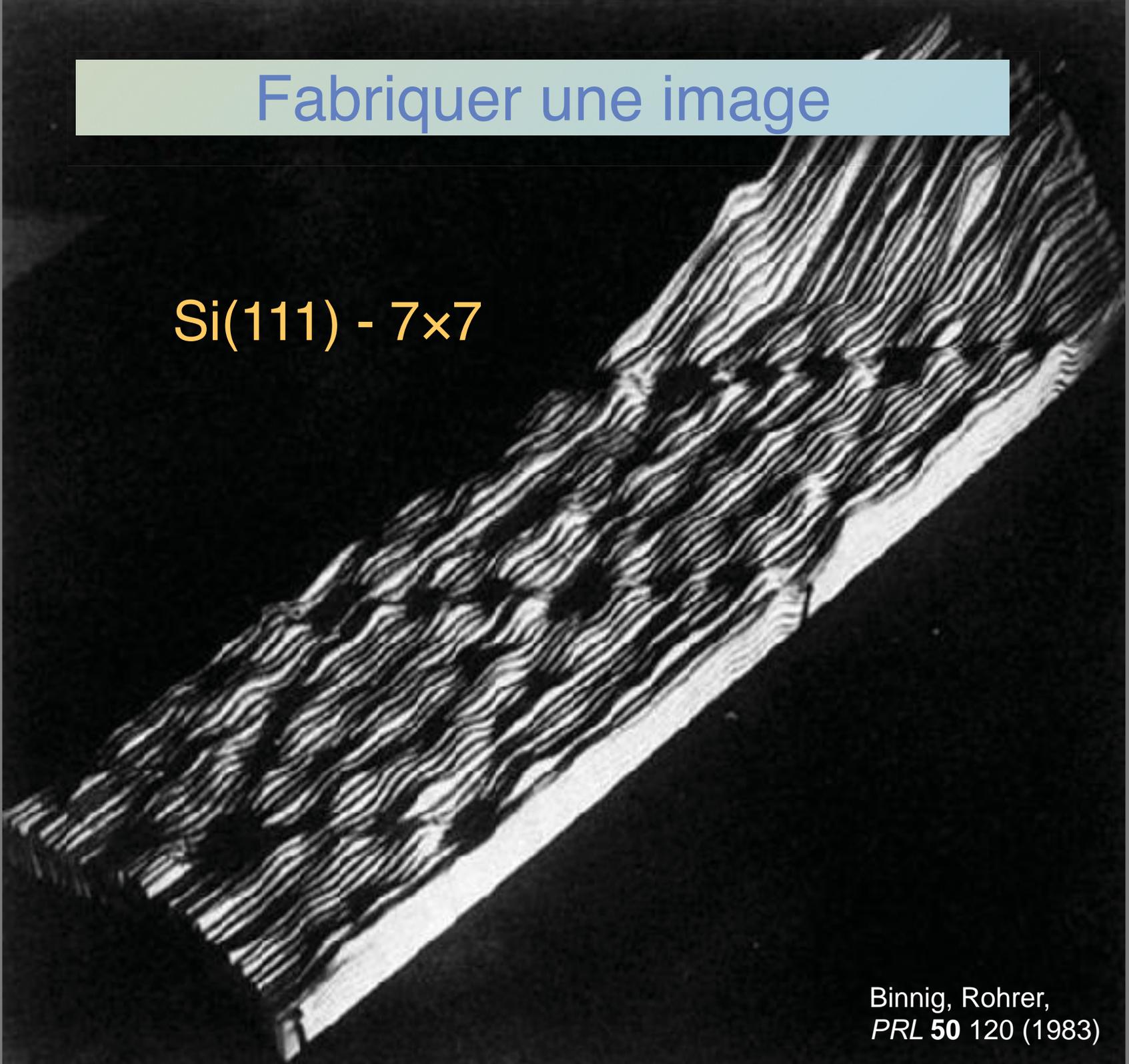
Fabriquer une image

STM : microscope à effet tunnel électronique

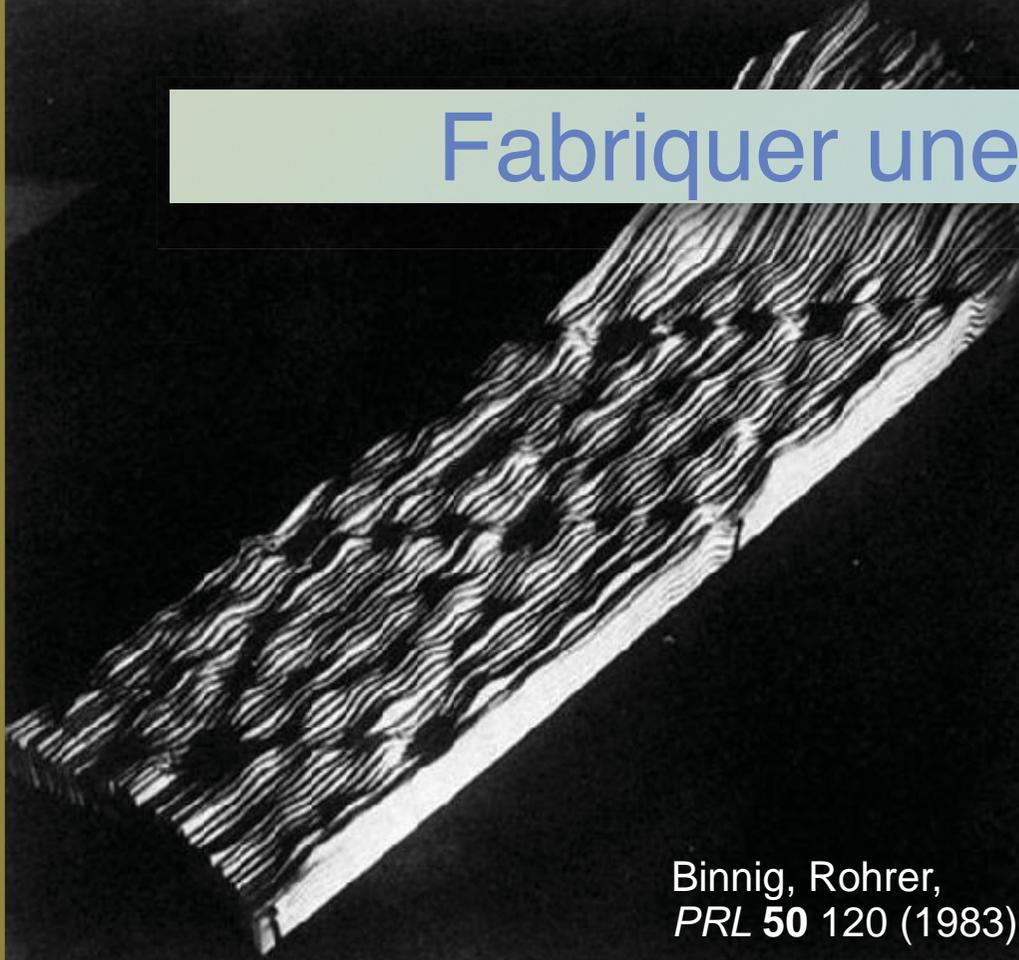


Fabriquer une image

Si(111) - 7x7



Fabriquer une image

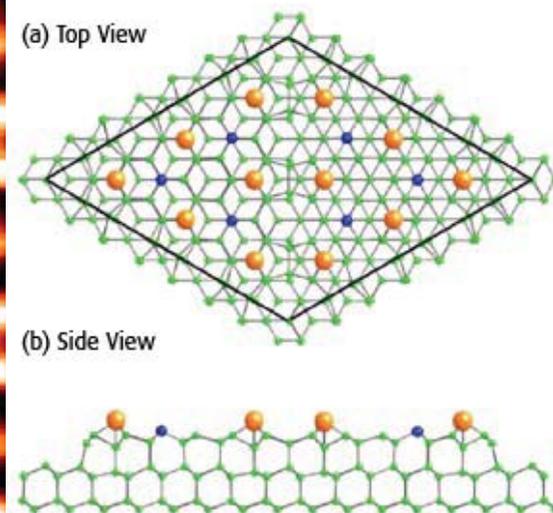
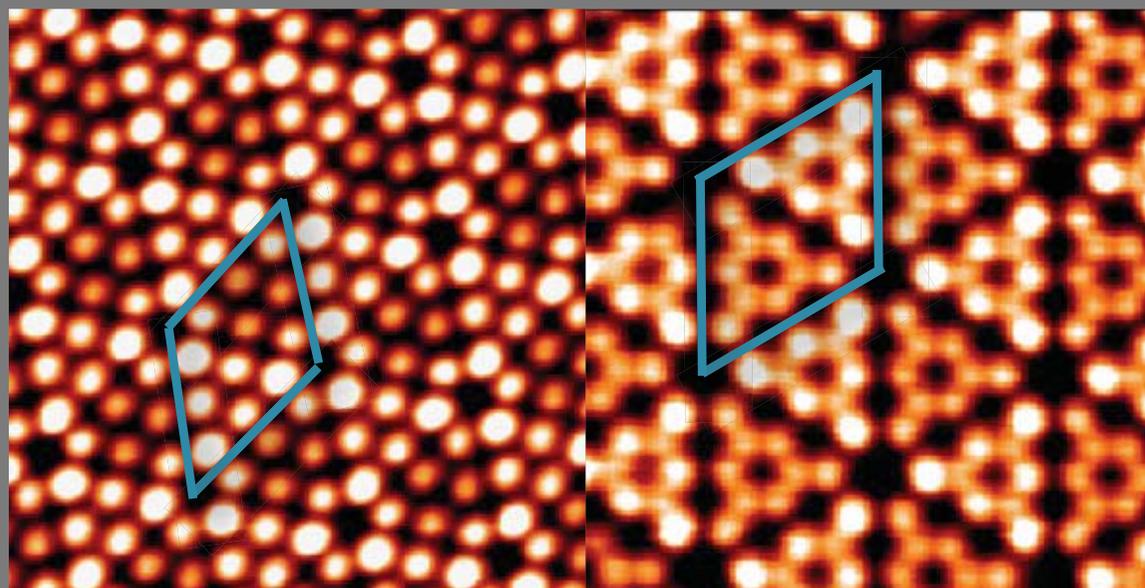


Binnig, Rohrer,
PRL **50** 120 (1983)

Si(111) - 7×7

Traitement de l'image

H.-J. Gao, *PRB* **70**, 073312 (2004)



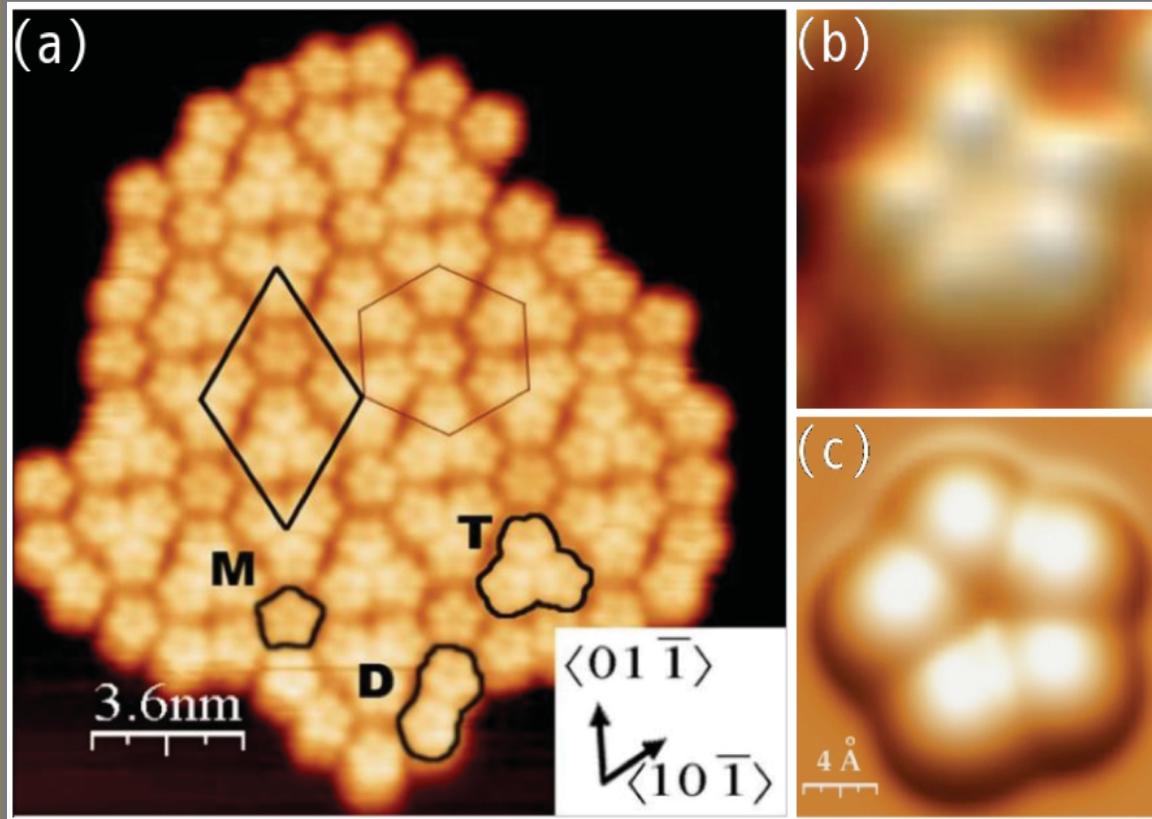
Fabriquer une image

Xenon Atom 

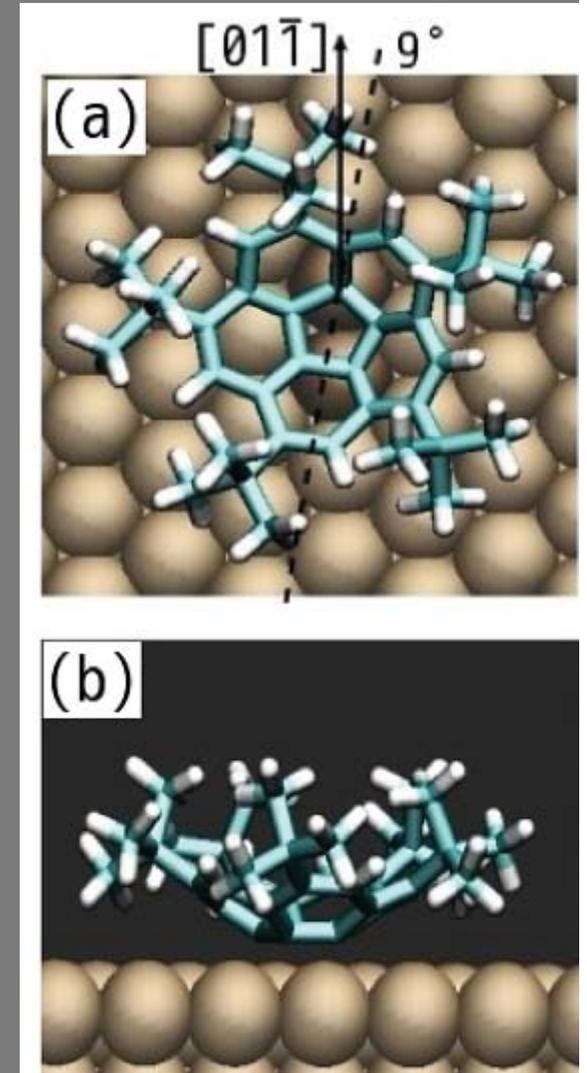
Filtre et rendu de la mesure

Fabriquer une image

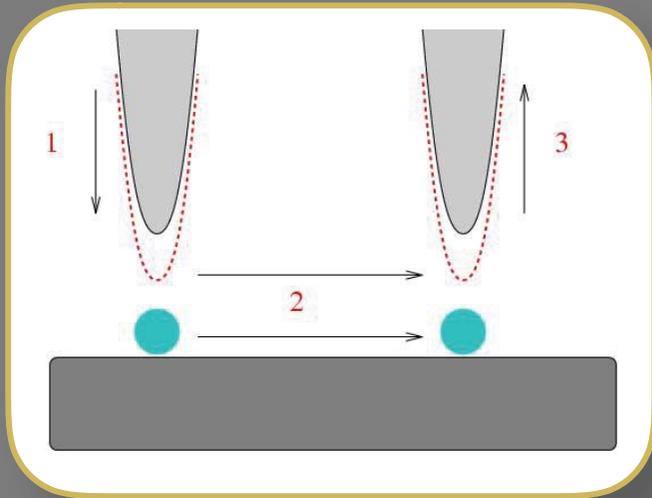
Expérience



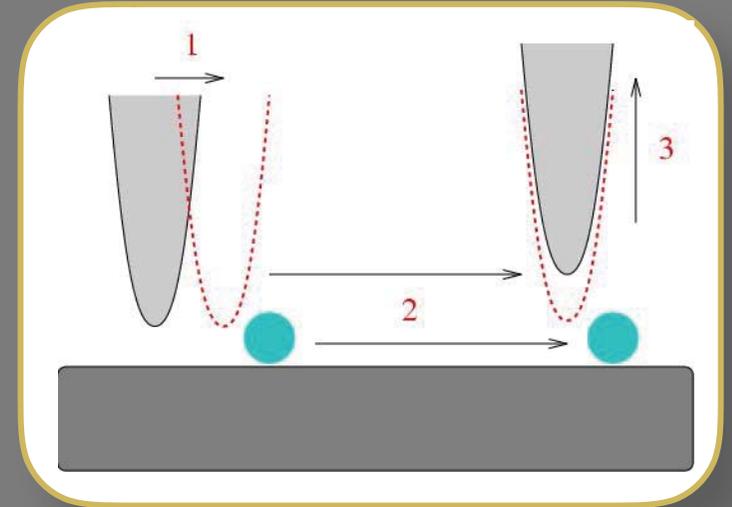
Calcul



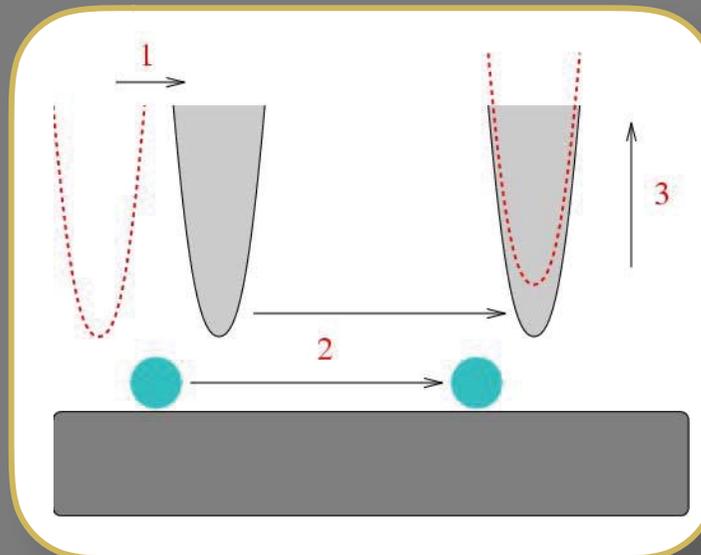
Manipulation latérale contrôlée



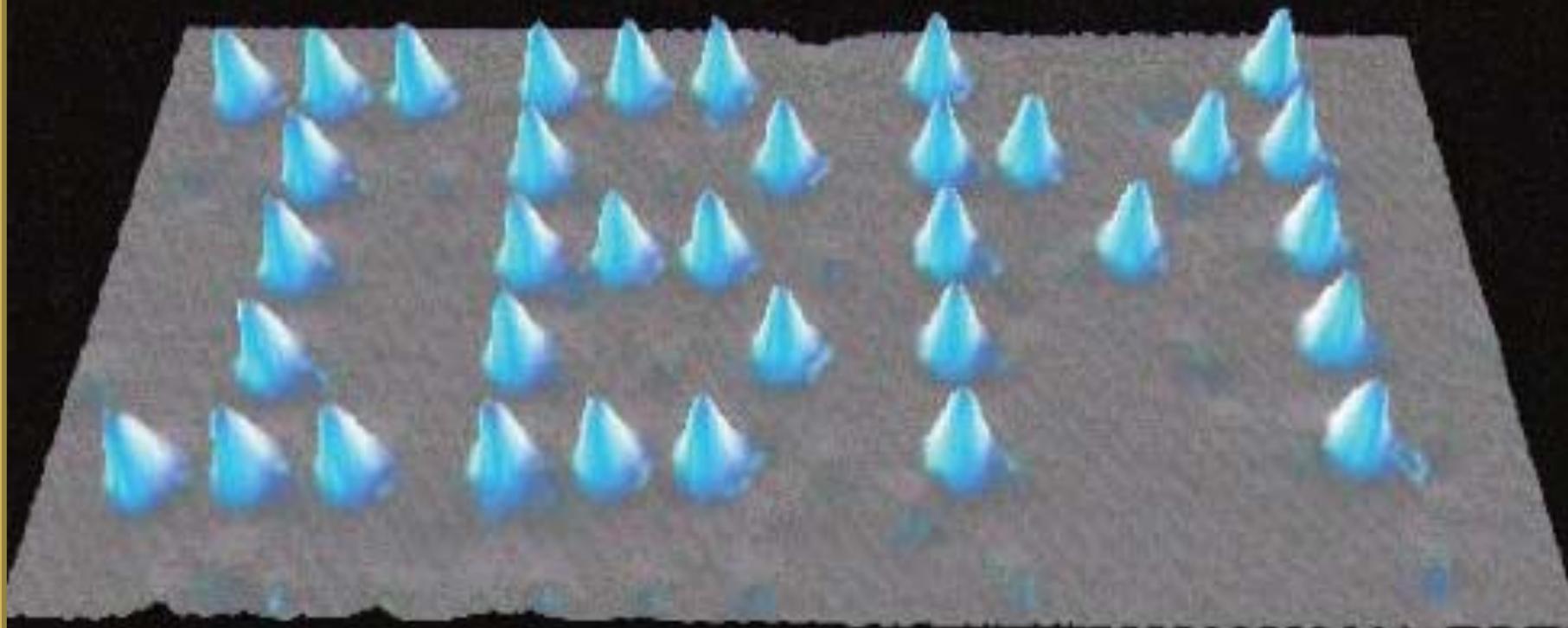
Mode de glissement



Mode de poussée



Mode de tirage



X. Bouju
CEMES-
CNRS

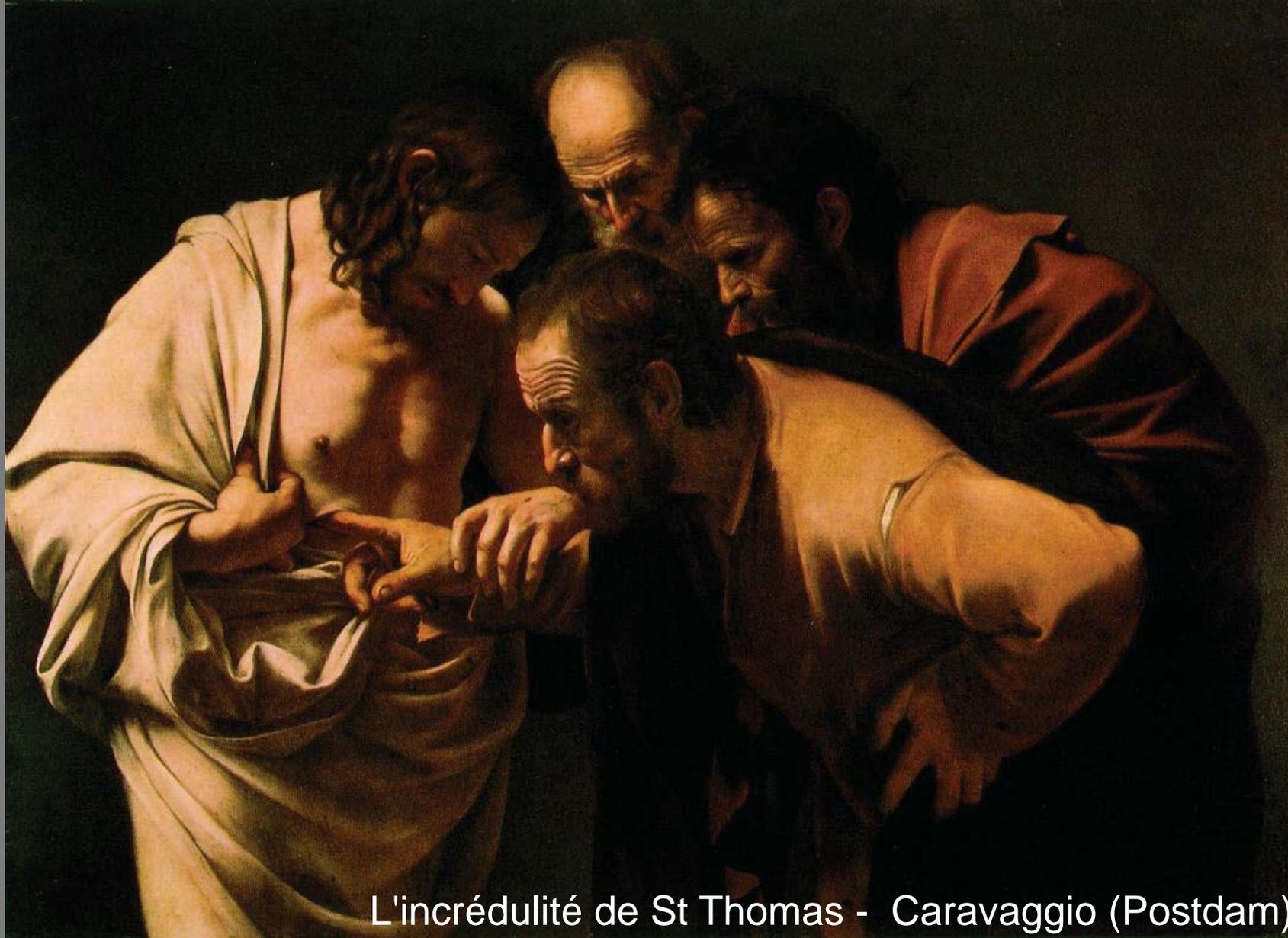
Xe/Ni(110)

Eigler, Schweizer, *Nature* **344** 524 (1990)



CEMES





L'incrédulité de St Thomas - Caravaggio (Postdam)

Image ne suffit pas : on veut toucher, on veut *rentrer* en interaction

Microscope à sonde locale : de l'optique à l'haptique



Explorer de nouveaux concepts
Approche bottom-up

Techno-mimétisme

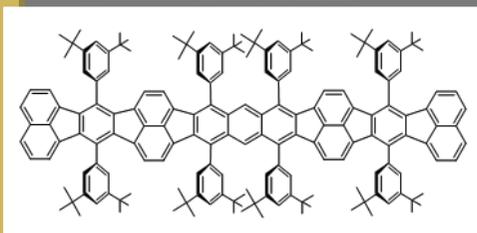
imitation du monde macroscopique vers le monde nanoscopique

Vers les machines moléculaires

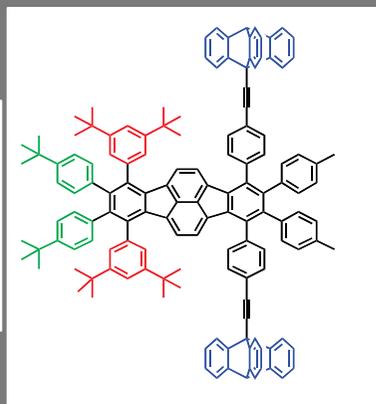


Explorer de nouveaux concepts Approche bottom-up

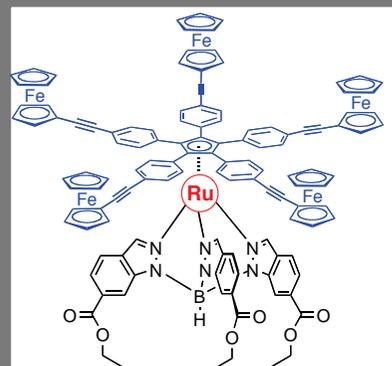
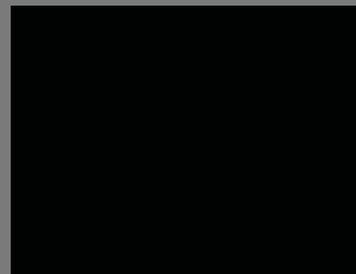
« Landers »



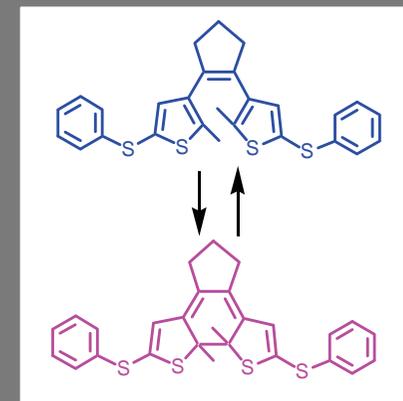
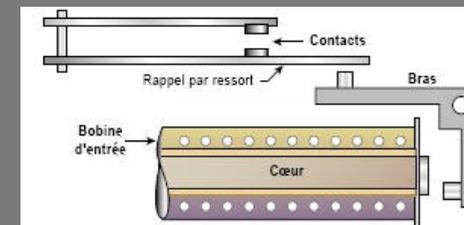
Brouette



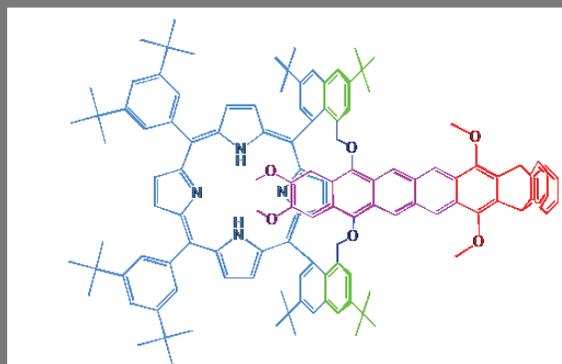
Moteur rotatif



Interrupteur



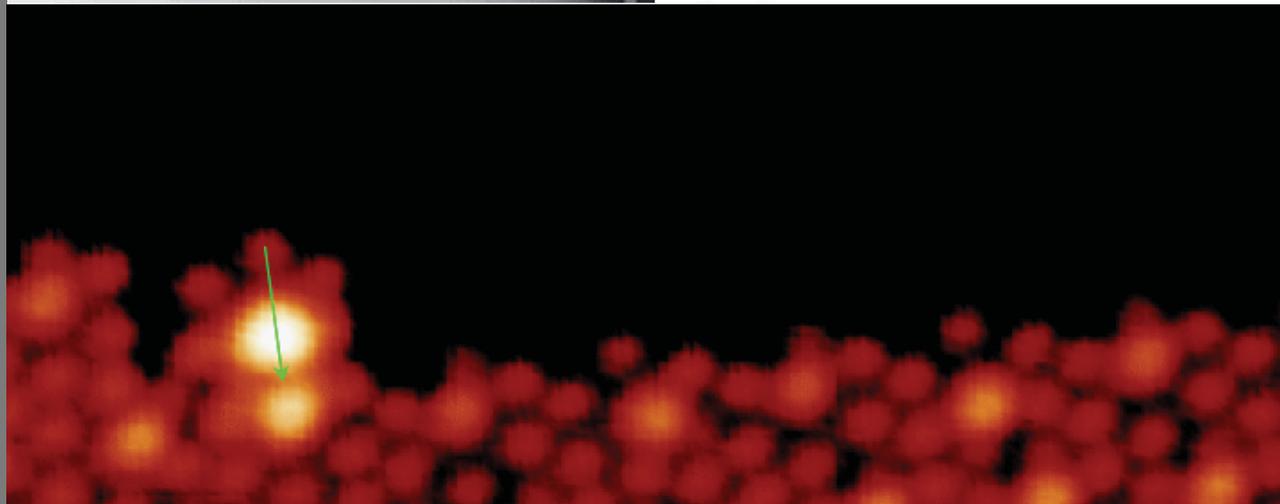
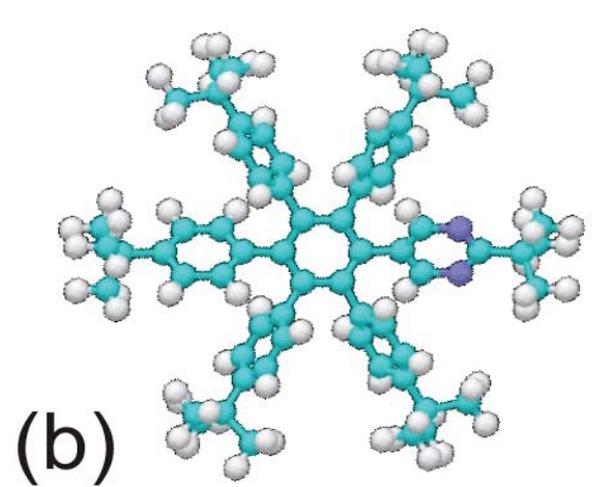
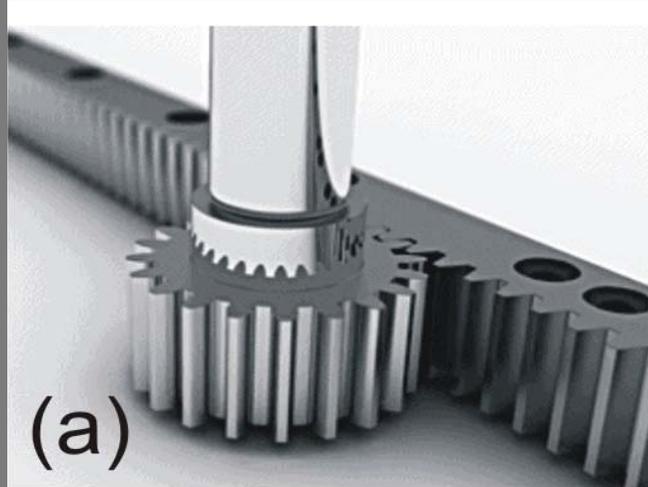
Manipulateur Morse



Molécule-machine

Image et représentation

A MOLECULAR RACK-AND-PINION





Explorer de nouveaux concepts



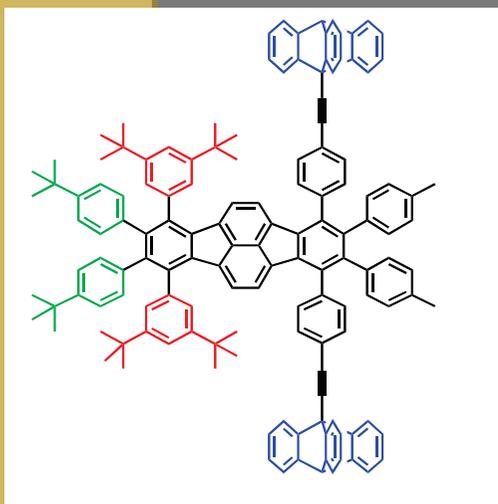
Transformer un mouvement de translation en
un mouvement de rotation

Techno-mimétisme



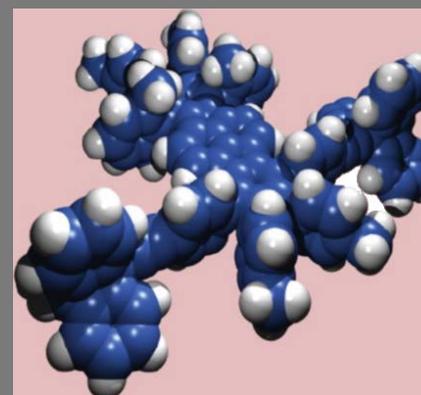
Une brouette moléculaire

- . Un châssis (plateau poly-aromatique central)
- . Deux axes indépendants reliés à :



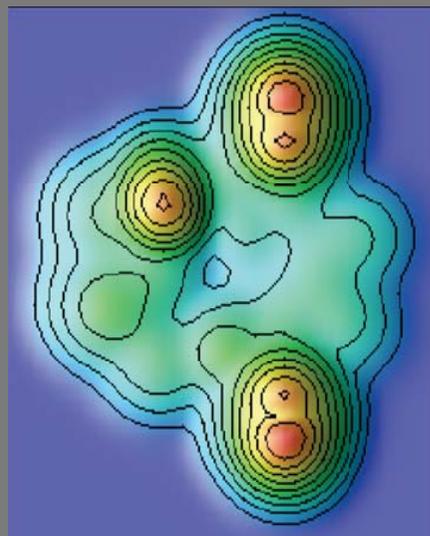
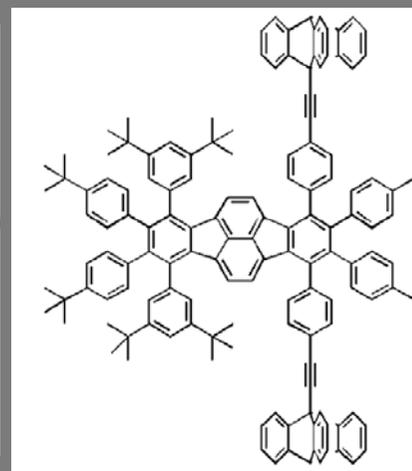
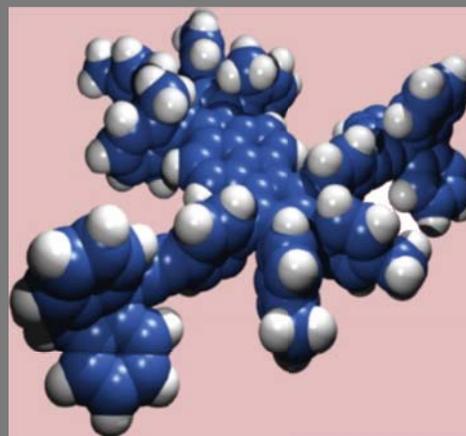
- **deux roues indépendantes** pour mouvement sur la surface
- **deux pieds** pour isoler le plateau de la surface
- **deux poignées** pour manipulation avec un pointe STM

Gwénaél
Rapenne

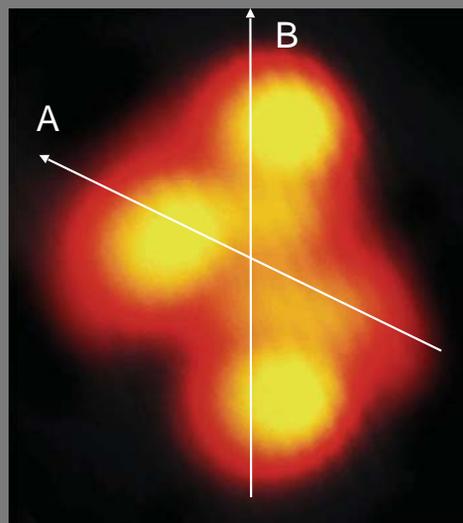


Molécule-machine

Image et représentation mentale
imitation du monde macroscopique vers le monde nanoscopique



*Image STM calculée
(ESQC)*



*Image
expérimentale*

Molécule-machine

Image et représentation mentale
imitation du monde macroscopique vers le monde nanoscopique

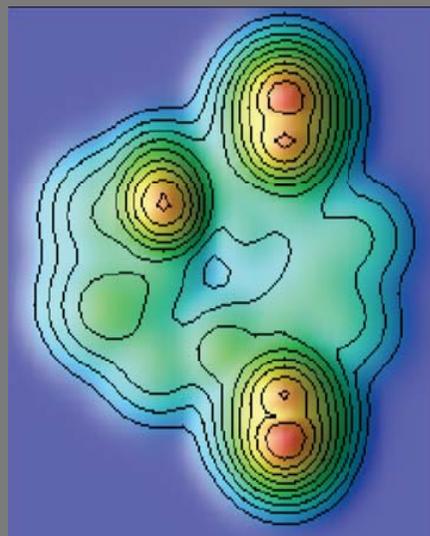
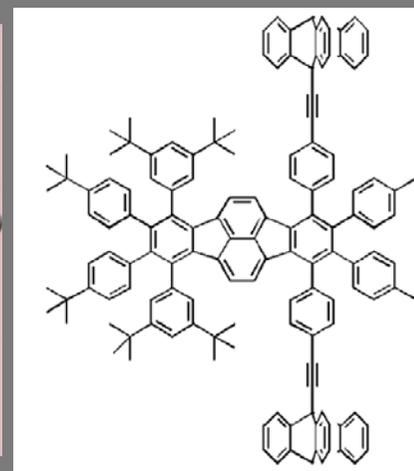
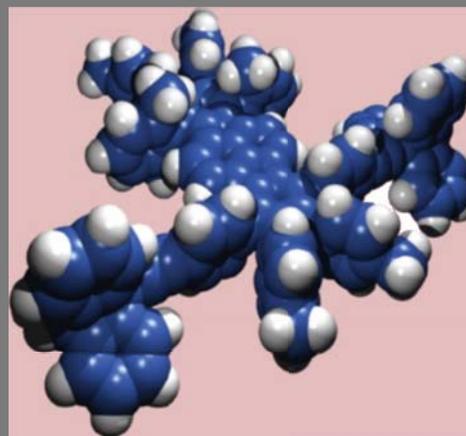


Image STM calculée
(ESQC)

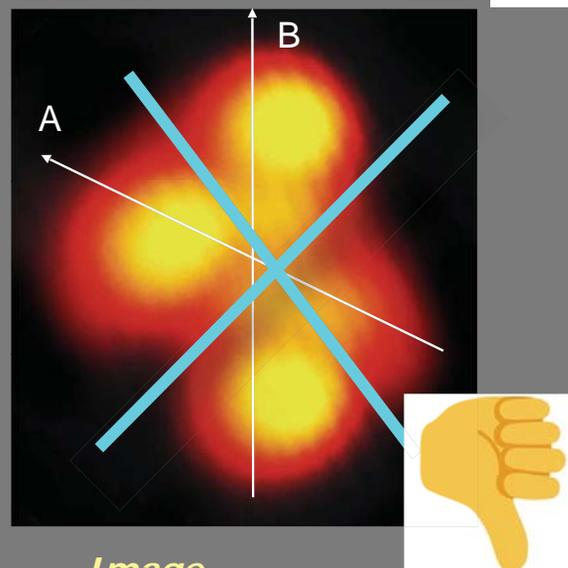


Image
expérimentale

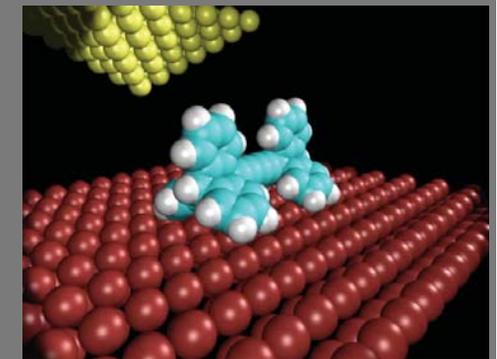
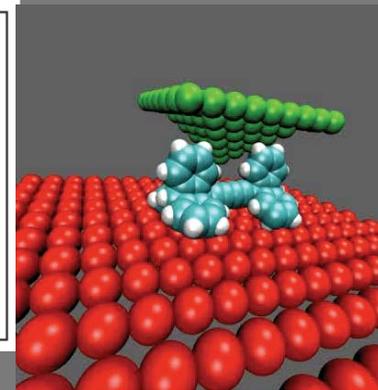
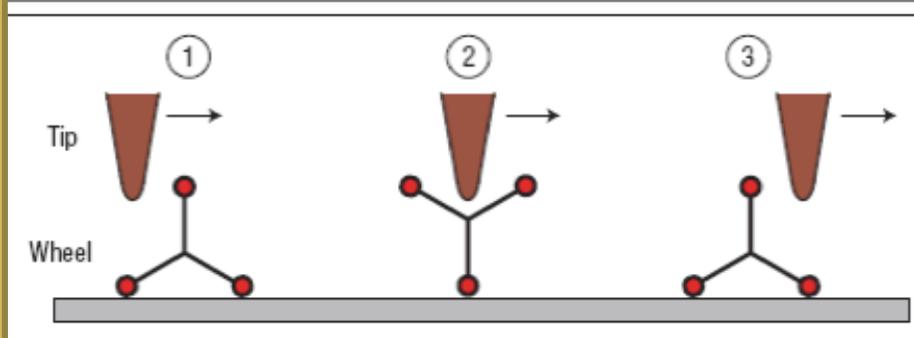
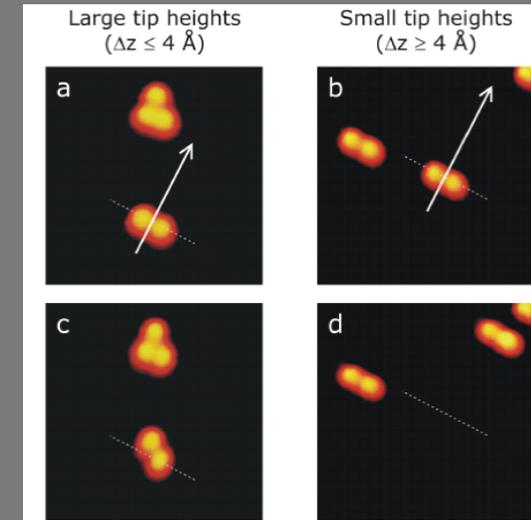
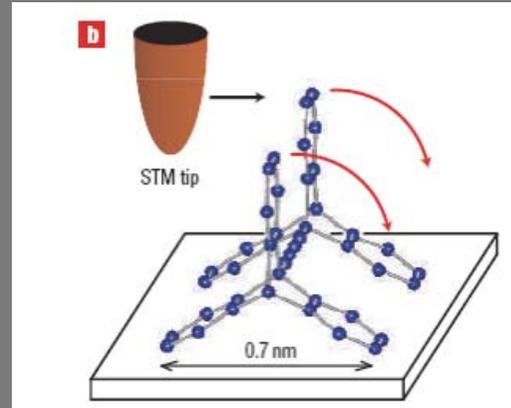
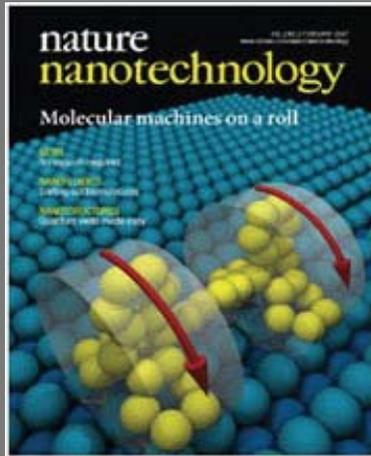
Est-on sur la bonne voie ?

Autres champs de forces

Explorer de nouveaux concepts

Molécule-machine artificielle

Démonstration de la rotation d'une roue moléculaire



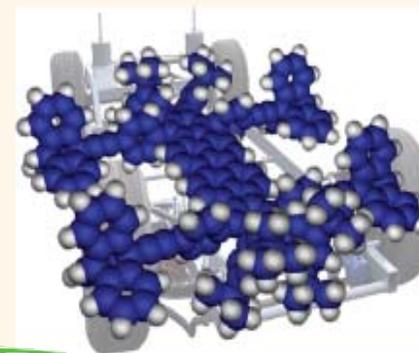
The nanocar race

Molecule Concept Nanocars: Chassis, Wheels, and Motors?

Christian Joachim^{1,4,*} and Gwénael Rapenne^{1,5}

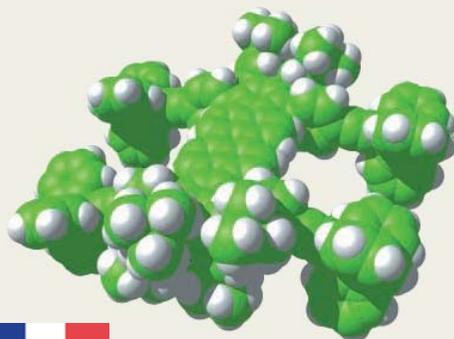
¹CEMES-CNRS, NanoSciences Group & MANA Satellite, 29 rue Jeanne Marvig, BP 94347, F-31055 Toulouse cedex 4, France, ²IMRE, A*STAR (Agency for Science, Technology and Research), 3 Research Link, 117602, Singapore, and ⁵Université de Toulouse, UPS, 118 route de Narbonne, F-31062 Toulouse cedex 9, France

ABSTRACT The design, synthesis, and running of a molecular nanovehicle on a surface assisted by proper nanocommunication channels for feeding and guiding the vehicle now constitute an active field of research and are no longer a nano-joke. In this Perspective, we describe how this field began, its growth, and problems to be solved. Better molecular wheels, a molecular motor with its own gears assembling for torque transmission must be mounted on (*i.e.*, chemically bonded to) a good molecular chassis for the resulting covalently constructed molecular nanovehicle to run on a surface in a controlled manner at the atomic scale. We propose a yearly molecule concept nanocar contest to boost molecular nanovehicle research.



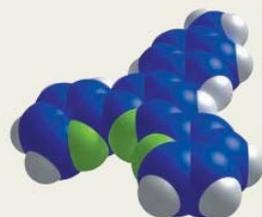
The nanocar race

6 équipes



THE GREEN BUGGY

Chassis curved to minimize interaction with surface.



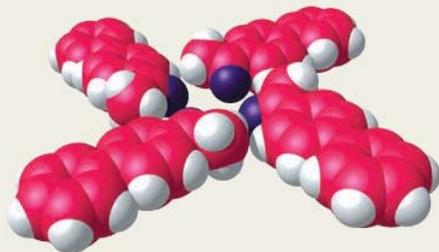
SWISS NANO DRAGSTER

Simple structure so that molecule won't fall apart during race.



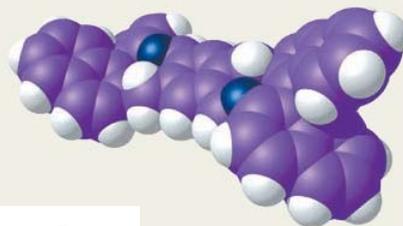
DIPOLAR RACER*

Has wheels, axles and a chassis.



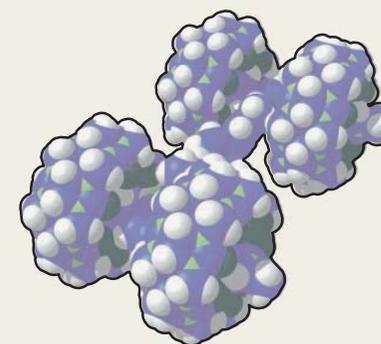
WINDMILL

Four blades allow steering in four directions.



NIMS-MANA CAR

Flaps flutter like a butterfly's wings.



OHIO BOBCAT NANO-WAGON*

Pumpkin-shaped wheels may roll or slide on surface.

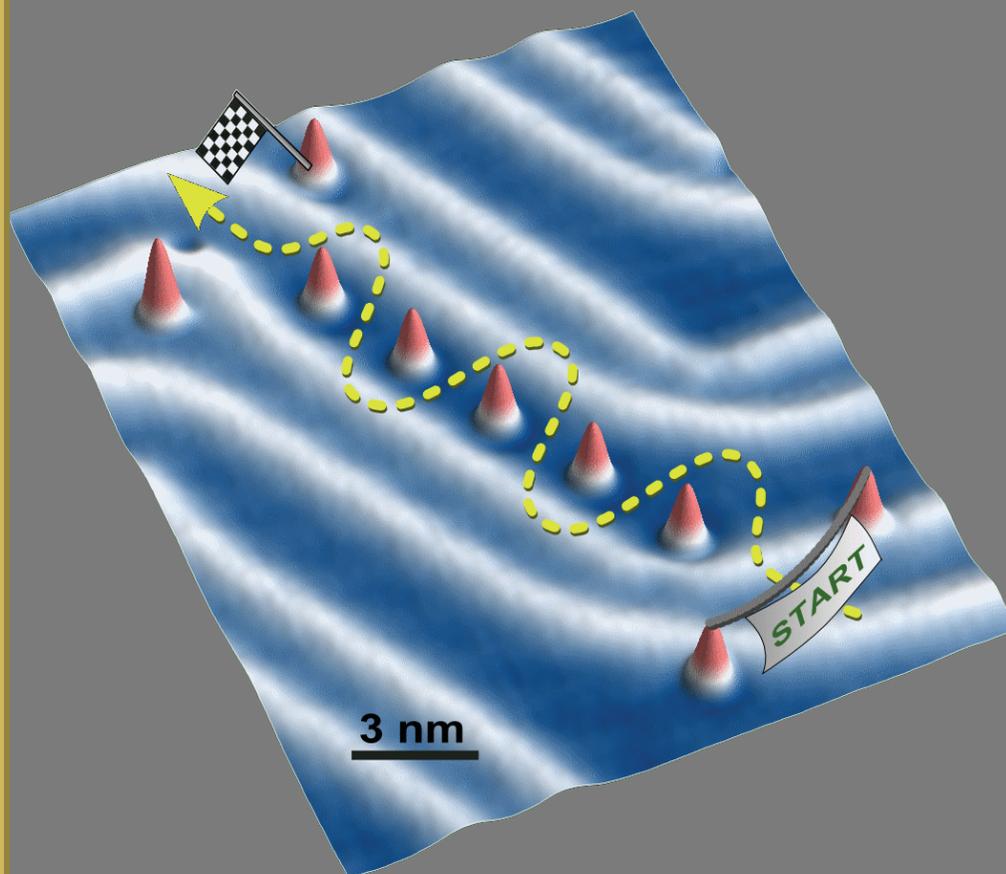
*Prototype model: final design not revealed

La nano-course de voiture

Règles

Piste : Au(111)

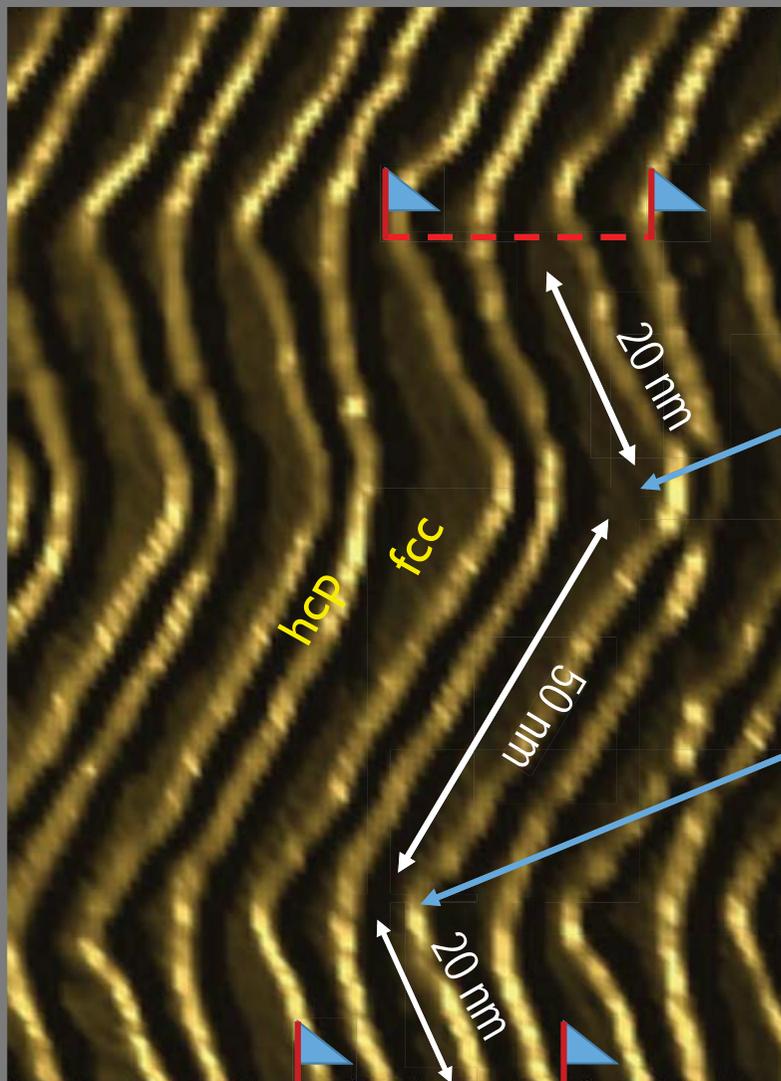
Manipuler une
molécule
individuelle
entre les lignes de
départ et d'arrivée



Au(111) image @ 4.7 K
W.H. Soe & C. Manzano (IMRE, 2013)

La nano-course de voiture

Règles



Piste : Au(111)

Virage 2

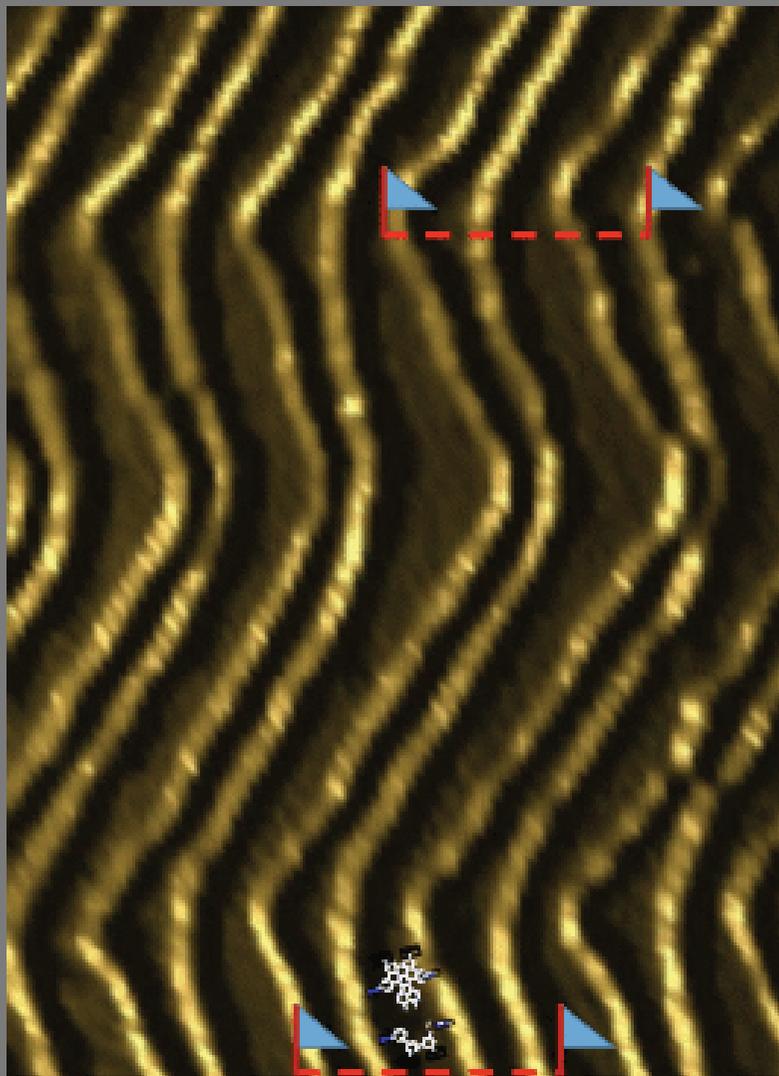
Manipuler une
molécule
individuelle
entre les lignes de
départ et d'arrivée

Virage 1

Image $36.5 \text{ nm} \times 48.6 \text{ nm}$ de la
reconstruction de surface.
Largeur de la piste : 4-6 nm
Hauteur du rail : 26 pm

La nano-course de voiture

Règles



Piste : Au(III)

Manipuler une
molécule
individuelle
entre les lignes de
départ et d'arrivée



The nanocar race

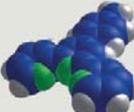
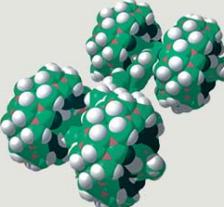
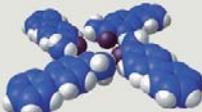
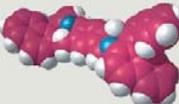
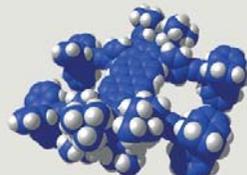
The 38h Grand Prix 28-29 avril 2017 I lam (Paris)

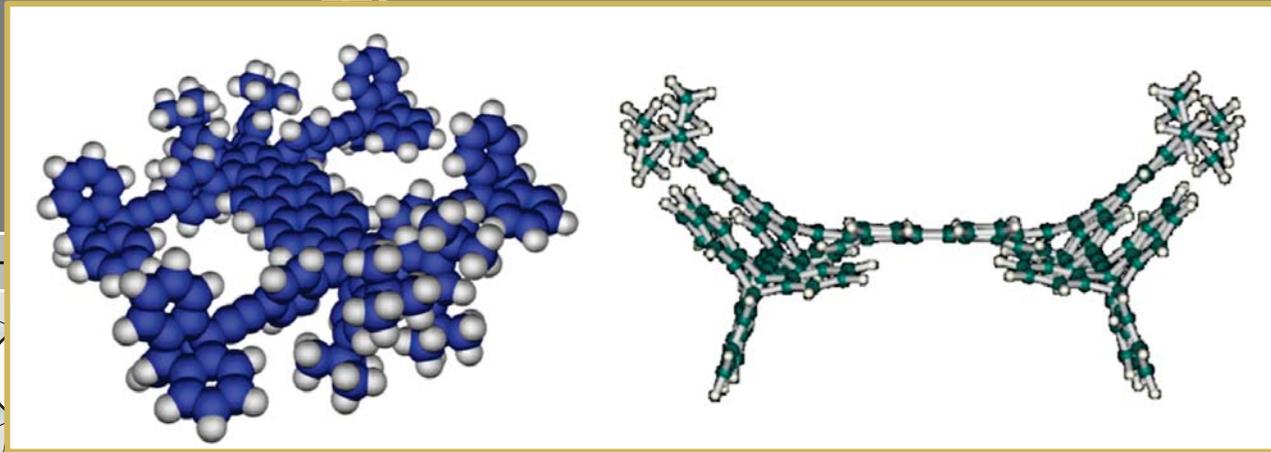


X. Bouju
CEMES-
CNRS



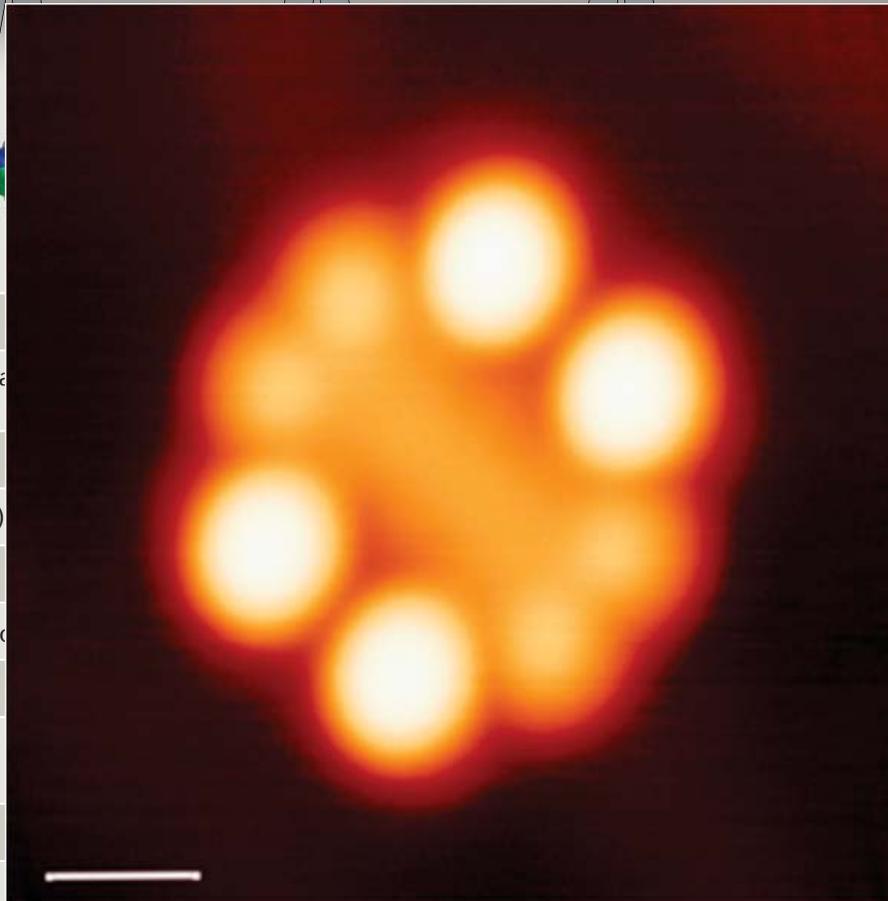
The nanocar race

Rice–Graz	Basel	Ohio	Dresden	Tsukuba	Toulouse
					
					
Team leader(s)					
Leonhard Grill and James Tour	Remy Pawlack	Saw-Wai Hla and Eric Masson	Francesca Moresco	Waka Nakanishi	Gwénaél Rapenne
Surface					
Ag(111)	Au(111) (shared)	Au(111)	Au(111) (shared)	Au(111) (shared)	Au(111) (shared)
Propulsion mechanism					
Dipolar	Inelastic	Dipolar	Inelastic	Inelastic	Inelastic
Driving distance					
150 nm 1.5 hours	133 nm 6 hours	43 nm 29 hours	11 nm First hour	1 nm First hour	25 nm by pulling (not allowed)
Incidents					
–	–	–	Molecule was stuck on a defect; molecule destroyed	Motor blocked	Molecule jumped on the tip



Rice

Toulouse



Team leader(s)

Leonhard Grill and James Tour Remy Pa...

Nakanishi Gwénaél Rapenne

Surface

Ag(111) Au(111)

1) (shared) Au(111) (shared)

Propulsion mechanism

Dipolar Inelastic

tic Inelastic

Driving distance

150 nm 133 nm
1.5 hours 6 hours

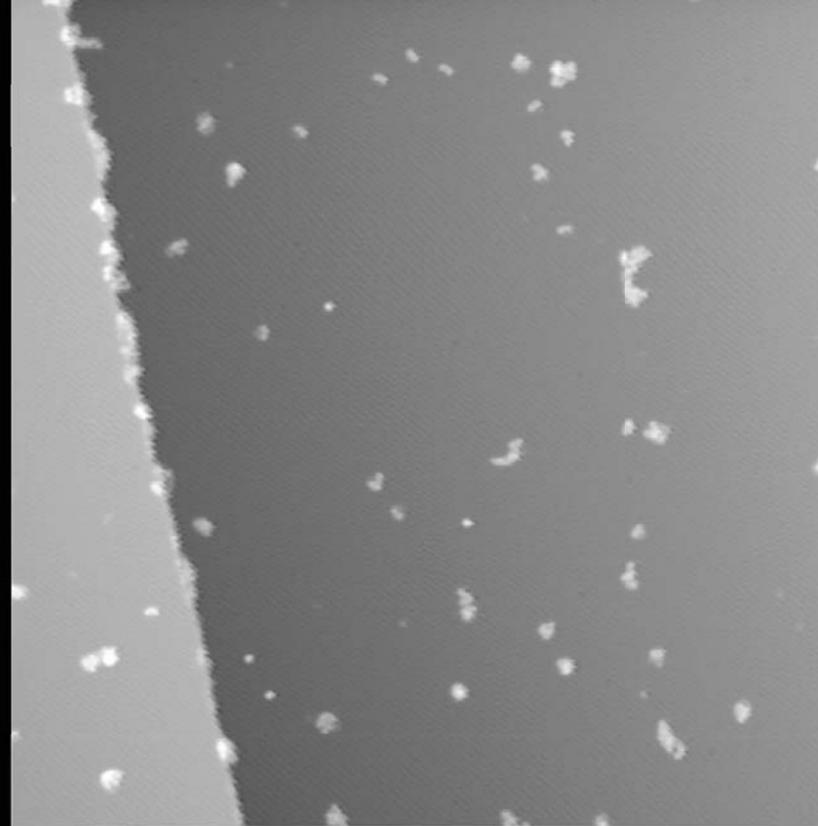
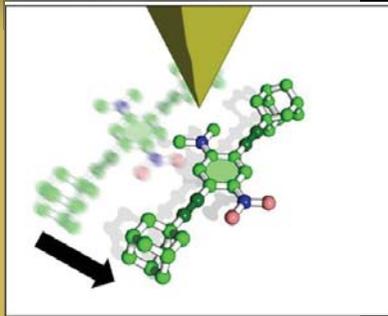
our 25 nm by pulling
(not allowed)

Incidents

- -

blocked Molecule jumped
on the tip

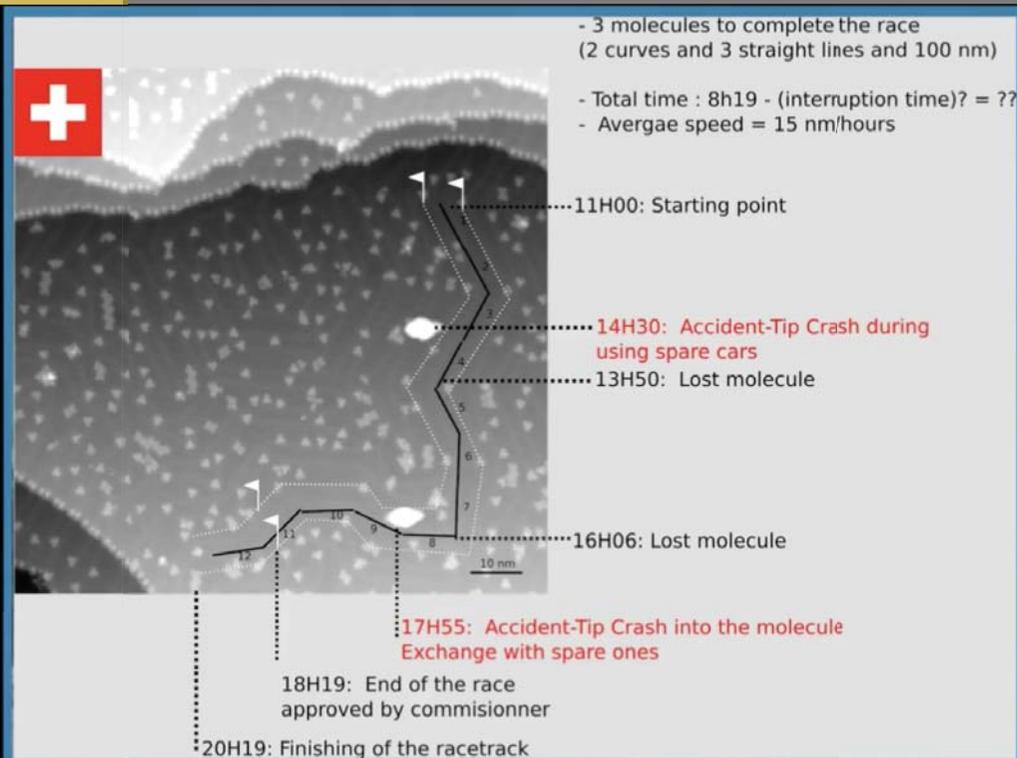
on a defect;
molecule destroyed



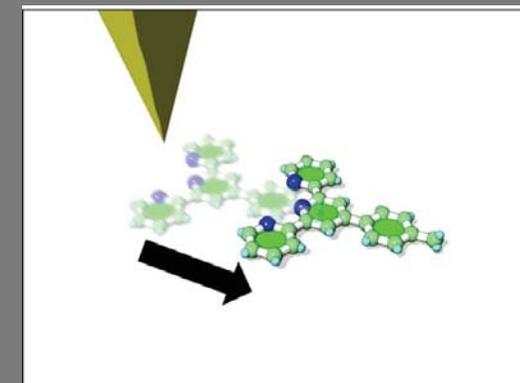
Race Time:
00 h 00 min

Actual Speed:
0.0 nm/h

Average Speed:
0.0 nm/h



Copyright L. Grill (University of Graz)





<https://memo-project.eu/>



NANOCAR RACE II 2021

Website for Nanocar Race II in 2021:

<https://memo-project.eu/flatCMS/index.php/Nanocar-Race-II>

Websites for Nanocar Race I in 2017:

<http://nanocar-race.cnrs.fr>

<http://www.cemes.fr/Molecule-car-Race>





Structure versus fonction

X. Bouju
CEMES-
CNRS



CEMES



Structure versus fonction

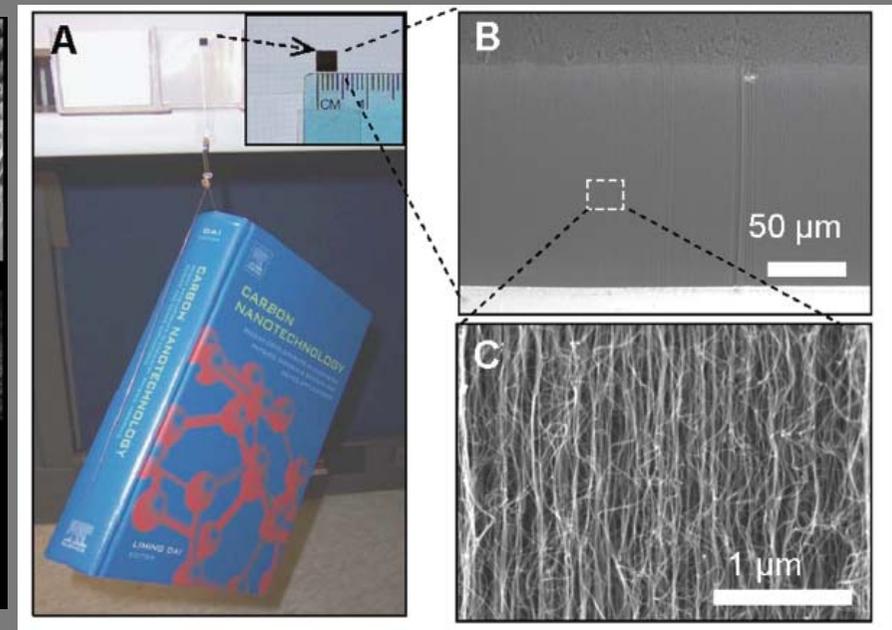
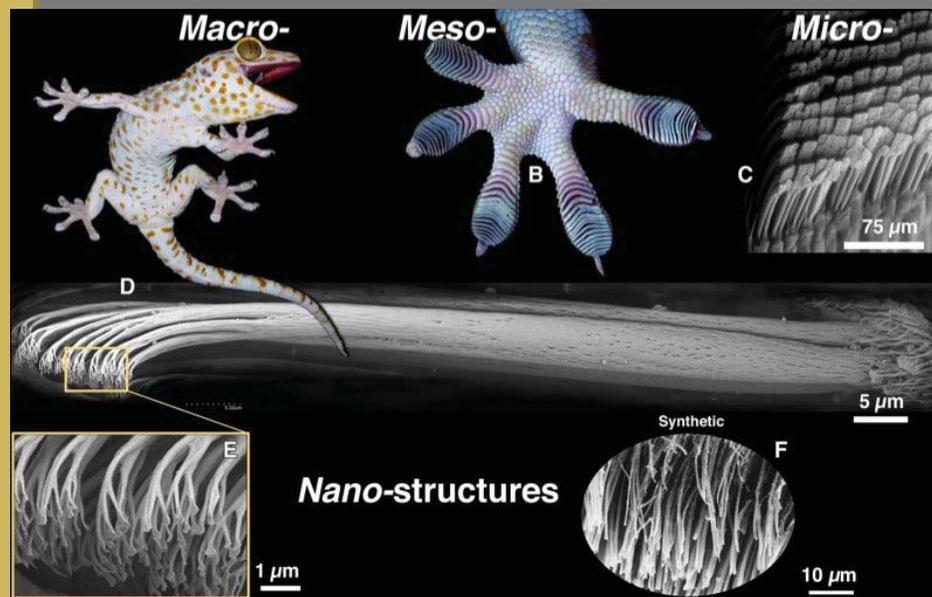
Inspiration : reproduire la fonction mais pas la structure



Structure versus fonction

Inspiration : reproduire la fonction mais pas la structure

Mimétisme : reproduire les propriétés d'une structure naturelle

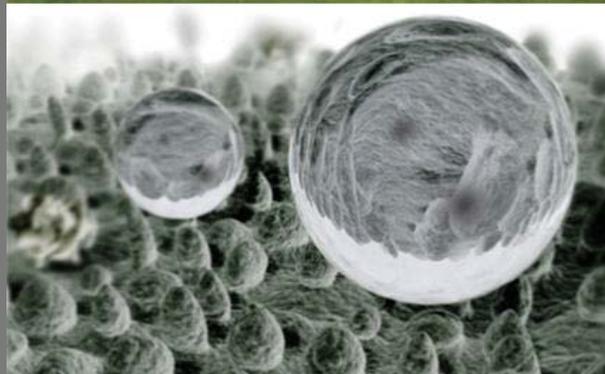


Structure versus fonction

Inspiration : reproduire la fonction mais pas la structure

Mimétisme : reproduire les propriétés d'une structure naturelle

Réplication : reproduire directement la structure naturelle



Problème - Message

À partir de fonctions usuelles d'objets ou de machines macroscopiques, concevoir le design d'objets équivalents à l'échelle nanoscopique (qui conservent les fonctions) en prenant en compte les contraintes (forces différentes) liées aux faibles dimensions

Molécule-machine artificielle

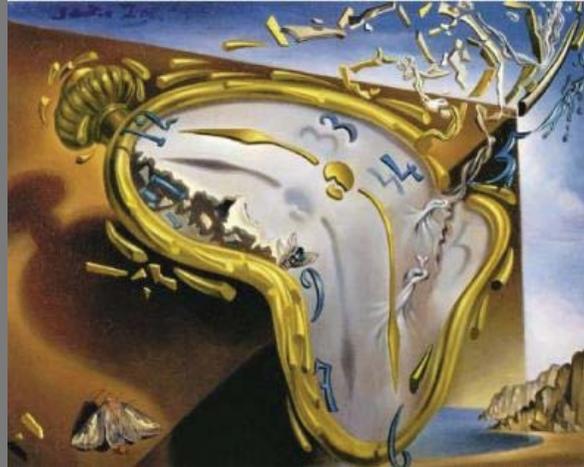


Molécule déformée une fois déposée sur la surface

Rétro-engineering ?

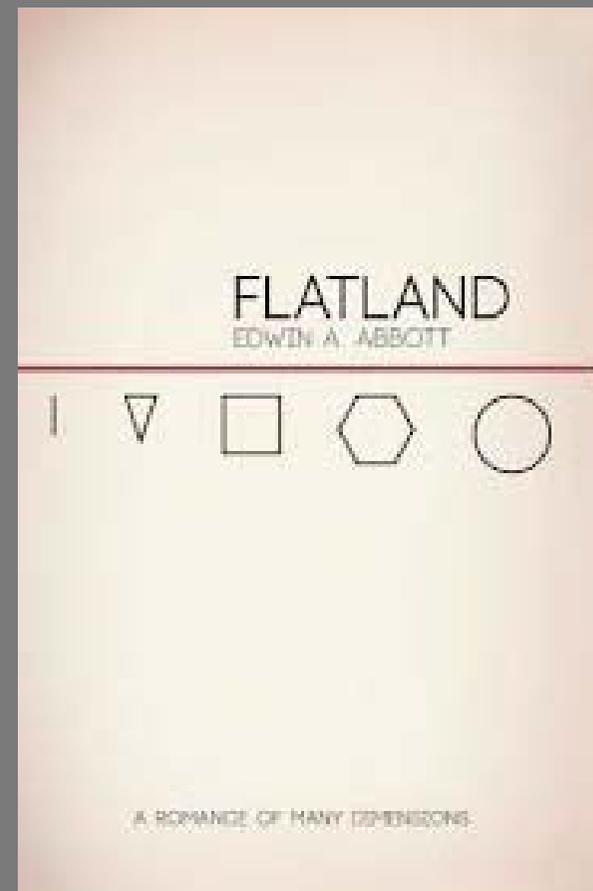
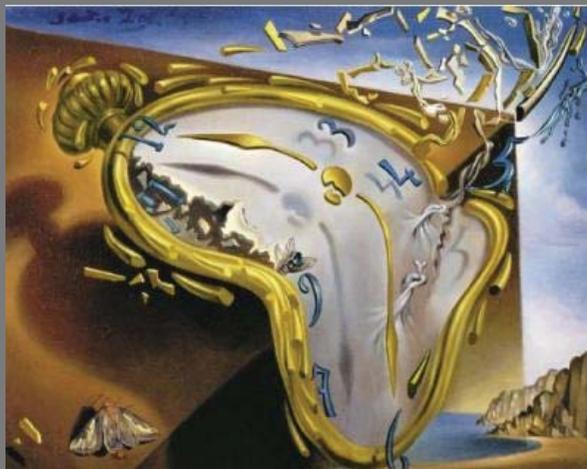
Molécule-machine artificielle

Molécule déformée une fois déposée sur la surface



Molécule-machine artificielle

Molécule déformée une fois déposée sur la surface



Molécule-machine artificielle

DESIGN

APPROCHES NUMÉRIQUES

Molécule déformée une fois déposée sur la surface

Dynamique moléculaire
Mécanique moléculaire
Système interactif



Molécule-machine artificielle



APPROCHES NUMÉRIQUES



X. Bouju
CEMES-
CNRS



Stéphane
Redon



Merci pour votre attention

X. Bouju
CEMES-
CNRS



CEMES

